

Doi :10.11840/j.issn.1001-6392.2015.02.006

# 黑潮延伸体海域海平面年际变化 及其与海流的关系

李杰<sup>1,2</sup>, 杜凌<sup>2</sup>, 韩飞<sup>3</sup>, 张秋丰<sup>1</sup>, 叶风娟<sup>1</sup>

(1. 国家海洋局天津海洋环境监测中心站, 天津 300457; 2. 中国海洋大学 海洋系, 山东 青岛 266100;  
3. 海南海业发展公司, 海南 海口 570203)

**摘 要**: 利用黑潮延伸体海域海平面异常 (SLA) 数据和 SODA 海流资料, 分析海平面和海流的年际变化特征, 以及两者之间的关系。分析发现黑潮延伸体 SLA 的第二模态是黑潮大弯曲模态, 存在 29 个月的准两年显著振荡。该海域海平面具有显著的年际变化, 且与 ENSO 和 PDO 密切相关, 2002–2004 年的黑潮大弯曲期间, 海平面与 Nino3 指数的相关系数为 0.74。海平面年际变化和海流关系密切, 黑潮延伸体主轴两侧海平面具有显著的季节和年际变化, 急流呈大弯曲路径 (1993–1996、2002–2004) 时, 流轴稳定流速大, 流轴影响深, 急流主轴南侧海平面较高, 达到年际变化的最大值, 主轴两侧海面高度梯度大。非弯曲期间, 急流主轴南压, 海流强度减弱, 此期间海平面低, 主轴两侧海面高度梯度较小。黑潮延伸体上游区海平面变化受黑潮大弯曲影响更为显著。上下游区的海平面和比容海平面的年际变化较为相似, 黑潮延伸体海域海流和比容效应共同调控该区域海平面变化。

**关键词**: 海平面; 年际变化; 黑潮大弯曲

中图分类号: P731.27

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2015)02-0158-10

## Inter-annual sea level variation and its relationship with Kurshio current in the Kurshio Extension

LI Jie<sup>1,2</sup>, DU Ling<sup>2</sup>, HAN Fei<sup>3</sup>, ZHANG Qiu-feng<sup>1</sup>, YE Feng-juan<sup>1</sup>

(1. Tianjin Marine Environmental Monitoring Central Station, Tianjin 300457, China; 2. Ocean University of China, Qingdao 266001, China;  
3. Hannan Haiye Development Company, Haikou 570203, China)

**Abstract**: Sea level variation and its relationship with the Kuroshio current were analyzed by using the AVISO altimeter data and SODA current data, in representative regional area, Kuroshio Extension (KE). The second Empirical Orthogonal Functions (EOF) of the sea level variation in the KE area represented a Kuroshio meander mode with a quasi-biannual period of 29 months. The inter-annual sea level variation related to the El Niño and Kuroshio current closely. The correlation coefficient between inter-annual sea level variation and El Niño was 0.74 during years of 2002–2004 when Kuroshio current was in well-advanced meander. In well-advanced meander years (1993–1996, 2002–2004), sea level was higher in the south of KE path, and sea level difference between the two sides of KE jet was larger. During no-meander periods, sea level was lower and sea level difference on both sides of jet was small. Sea level variation of up-stream area was affected more significantly by Kuroshio meander than that of down-stream area. Inter-annual variation of the T/P sea level and steric sea level varied similarly in the up and down-stream areas. The Kuroshio extension sea currents and steric effect controlled the regional sea level changes.

**Keywords**: sea level; inter-annual variation; kuroshio meander

收稿日期: 2014-09-04; 修订日期: 2014-10-08

基金项目: 国家自然科学基金 (41376008, 41176009); 973 项目 (2012CB417401); 全球变化与海气相互作用专项 (GASI-03-01-01-09); 北海分局海洋科技项目 (2014B06)。

作者简介: 李杰 (1985-), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事潮汐与海平面变化研究。电子邮箱: jielouc@126.com。

通讯作者: 杜凌, 电子邮箱: duling@ouc.edu.cn。

<http://hytb.nmdis.org.cn>

20 世纪是近几百年来全球海平面上升最为显著的时期,人类活动对海洋——大气系统影响的加剧,海平面上升对人类生存环境产生日益严重的威胁,成为全球关注的热点问题。政府间气候变化专业委员会 (IPCC) 第四次评估报告中指出,全球尺度上海平面上升具有显著的区域性特征,过去 10 年日本岛东南侧海域 (黑潮延伸体, KE 区) 的海平面上升异常显著 (杜凌, 2005)。自 20 世纪 40 年代的风生海洋环流理论以来,伴随着多项国际联合观测项目的实施,黑潮及其延伸体流变化研究成为新的研究热点,特别是 2004 年由美国海洋大气管理局 (NOAA)、夏威夷大学等多家研究机构参加的黑潮延伸体系统研究 (Kuroshio Extension System Study, KESS) 项目,旨在研究黑潮延伸体海域海流变化及其相关物理过程。

黑潮延伸体海域是全球海平面变化的重要区域,该海域的海平面存在显著的季节和年际变化。利用卫星高度计资料分析 1993–2004 年黑潮延伸体海域海平面变化,发现黑潮延伸体海域海平面呈上升趋势,且上升率为 8.89 mm/a,海平面变化的显著周期为半年、1 年和 6 年 (高理, 2007; 潘家玮, 1997)。1993–1994 年黑潮延伸体海平面高度 (SSH) 的空间分布与气候态 SSH 场相似,而 1997 年 SSH 与气候态 SSH 场却相差很大,在 2002–2004 年间,平均 SSH 的空间分布再次和气候态接近 (Qiu, 2004)。在年际变化尺度上,处于 El Niño 年或 PDO 暖位相时,黑潮入侵南海加强 (杨龙奇, 2014),黑潮反气旋涡的脱落对南海海温有影响 (曾丽丽, 2006),在黑潮延伸体海域海平面异常和海温异常也对 El Niño/La Niña 有响应 (高理, 2007)。风强迫 Rossby 波在时间上对 KE 变化有重大影响,风应力强迫 Rossby 波伴随着海平面西传,调整日本以东 KE 区海平面在时间上的变化 (Taguchi et al, 2007)。此外, Naeije (2000) 也认为比容变化、风应力是黑潮延伸体海域海平面变化的主要影响因素。

作为副热带环流系统的重要流系,黑潮路径、流轴等特征变化较为复杂,且黑潮海域海平面年际变化与黑潮所携带的年际信号密切相关。贾英来 (2004) 利用石垣–基隆两验潮站海平面高度差资料计算黑潮流量,小波分析显示台湾以东黑潮流量具有 2–5 年的显著周期 (峰值分别在 2 年和 5

年),受黑潮的影响,东中国海海平面在年际尺度上具有准 2 年的周期 (颜梅等, 2008)。利用中国近海的烟台、青岛、连云港、基隆等站点分析我国海平面变化,发现黑潮大弯曲影响为主时,海平面上升,出现高海平面值; El Niño 事件影响为主时,海平面下降,出现低海平面值 (李坤平等, 1993)。黑潮弯曲及流速变化、中尺度涡的产生和移动是影响黑潮附近海域的海面高度异常变化的主要因素 (潘家玮, 1997; Qiu, 2005)。对日本以东黑潮区域海平面变化进行 EOF 分析发现第一模态再现了 KE 流轴向南迁移,第二模态则反应了 KE 主轴强度的准年代际变化 (Taguchi et al, 2007)。综上所述,黑潮延伸体海域海平面与海流密切相关。

本文利用 1992 年 12 月–2012 年 3 月的海平面异常数据,分析黑潮延伸体海域海平面变化特征;结合海流资料,具体探究该研究海域海平面与黑潮的季节及年际变化规律,进而通过主轴两侧海面高度差和比容海平面,分析动力和热力学影响因素在海平面变化中的作用。

## 1 资料说明

本文采用的海平面异常 (SLA) 数据是由法国国家空间研究中心 (CNES) 的卫星海洋学存档数据中心 (AVISO) 提供,它是 TP/Jason-1 和 ERS/Envisat 网格化融合数据。该数据空间分辨率为  $1/3^{\circ} \times 1/3^{\circ}$ ,时间间隔为 7 d,该 SLA 数据的平均参考面为同一点 1993 年 1 月–1999 年 12 月的平均值。该数据已经进行了各种校正,包括电离层、干湿对流层内的大气效应、固体潮和海洋潮、极潮、反气压订正和仪器订正等,精度约为 2–3 cm。

海流资料采用的是美国马里兰大学 SODA (Simple Ocean Data Assimilation) 2.0.2–4 版月均海流、温度、盐度资料格点资料。该资料是利用高分辨率的海洋环流模式,同化了水文站、投弃式深温计等实测资料的再分析产品。SODA 海洋数据集覆盖范围  $0.25^{\circ} \text{E}–359.75^{\circ} \text{E}$ ,  $75.25^{\circ} \text{S}–89.25^{\circ} \text{N}$ ,水平分辨率为  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。垂直方向上为不等距分层,共 40 层,深度可达 5374 m。蔡榕硕 (2009) 用 SODA 数据与观测资料比较发现,在台湾以东黑潮流量与 Johns (2001) 实测资料的结果很接近,在黑潮延伸体附近  $137^{\circ} \text{E}$  断面的黑潮流量与王元培

(1995) 观测资料的计算结果基本吻合, 因此本文采用 SODA 海流资料分析黑潮延伸体海域海流变化。温度和盐度数据用于研究海水温盐变化的比容效应对区域海平面变化的影响。

## 2 黑潮延伸体海平面变化

### 2.1 黑潮及其延伸体海平面变化时空特征

对海面高度异常数据利用经验正交函数 (EOF) 方法分析, 得到前 3 个模态的方差贡献分别为: 22.7%、6.4%、3.8%, 累计方差贡献 32.9%。第二模态和第三模态方差贡献比较接近, 根据 North 准则判断得两个模态是可以分离的, 下面我们只对前两个模态进行分析。

海平面变化第一模态是季节模态, 还具有显著的年代际变化特征。日本以东黑潮主轴南侧海域 (35°N, 140°E-150°E) 是季节变化最显著的核心区 (图 1), 该海域也是全球海平面变化最显著的海域 (杜凌, 2005)。该核心区存在两个正异常区域对称分布, 另有一负异常区域在北面与其毗邻; 140°E-180°E 海域, 受黑潮急流和中尺度涡影响, 正负异常交替存在, 自西向东随着能量的衰减, 涡的强度不断衰减, 至 180°E 几乎消失。

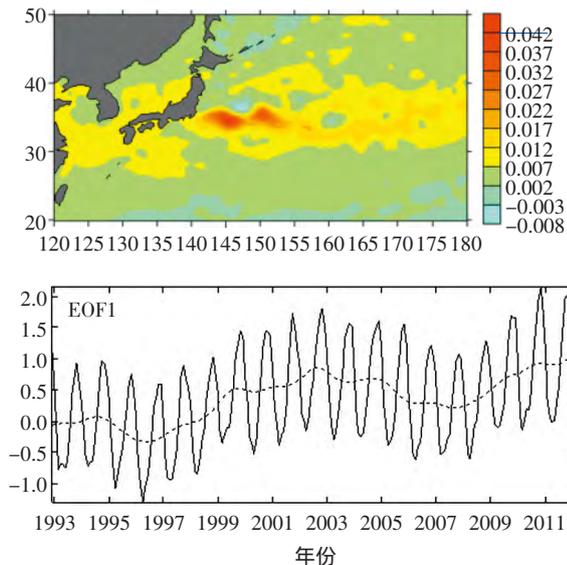


图 1 黑潮延伸体海平面变化第一模态

海平面变化第二模态 (95% 置信检验) 存在 29 个月的准两年振荡。日本以南黑潮离岸弯曲处是海平面变化正异常极值区, 日本以东准静态弯曲海域是负异常极值区 (图 2)。1993-1994 年时间

系数在零值附近, 此期间黑潮主轴大弯曲虽然存在, 但大弯曲强度较弱; 到 1996 年下半年, 黑潮主轴大弯曲消失, 海平面负异常占主导, 海平面下降至最低; 在接下来的 1997-1998 年黑潮延伸体流稳定, KE 区海平面有所回升; 1999 年黑潮再次出现流轴紊乱现象, 海平面处于较低值; 1999-2001 年日本南部的黑潮大弯曲处于成长过程中; 2002-2005 年间大弯曲成长完全, 流轴北抬且稳定, 该时间段内主轴南侧为海平面正异常, 且远远高于其他年份; 2006 年弯曲消失, 流轴变化复杂, 主轴南侧则主要表现为海平面负异常。因此, 该模态是黑潮大弯曲模态。

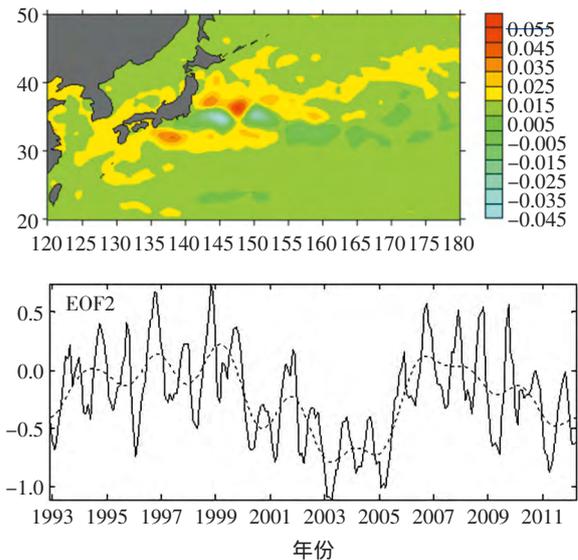


图 2 黑潮延伸体海平面变化第二模态

### 2.2 黑潮延伸体海平面的年际变化特征

黑潮延伸体海平面全年最高值出现在 10 月份, 最低值发生在 3 月份, 季节变幅约为 12 cm, 春季海平面低而秋季海平面高, 呈现显著的季节变化。将黑潮延伸体海域平均的海平面变化进行随机动态分析, 从 SLA 序列中剔除长期趋势和季节及季节内变化, 得到残差序列 ( $R_{SLA}$ ) 用以分析海平面的年际变化特征 (图 3)。

黑潮延伸体海域海平面年际变幅只有 5 cm 左右, 远小于季节变化振幅。El Niño 初期全球平均海面升高, 后期海平面下降 (荣增瑞, 2008)。1993-1994 年黑潮延伸体海域的  $R_{SLA}$  正负异常交替出现, 1995 年之后出现明显的负异常, 且急剧下降, 达到了这一时期内的最低值; 在 1997/1998

El Niño 期间海平面低频分量显著上升，由负异常转为正异常；在接下来的 La Niña 期间海平面稍有下降，但始终保持为正异常，这可能与 1997/1998 El Niño 期间海洋环流和海水温盐结构调整有关；2002–2003 年 El Niño 期间，海平面年际变化稍有增大；2005 年之后再次呈现为负异常海平面；2009 年弱 El Niño 之后，海平面逐渐转变为正异常。

海平面的低频分量 ( $R_{SLA}$ ) 和 Nino3 指数有很好的相关性。1997–2001 年，同步相关可达 -0.58，表明黑潮延伸体海域海平面变化在一定程度上受 El Niño 影响；而 2002–2004 黑潮发生大弯曲，两者则表现为正相关，相关系数为 0.74，2008–2012 年期间，SLA 滞后 10 个月，两者相关系数可达 0.77。黑潮延伸体海域海平面的年际变化与太平洋年代际涛动 (PDO) 的关系如图 3 所示，两者呈负相关关系，同步相关系数为 -0.38；1997/1998 El Niño 前后 (1995–2002) 相关系数高达 -0.73，2002–2004 黑潮大弯曲期间，海平面低频变化与 PDO 变化趋势相似，2008–2012 年海平面年际变化稍有滞后，海平面滞后 PDO 指数 5 个月相关系数可达 0.75。这表明该区域海平面的低频变化受海洋大气大尺度相互作用影响显著。年代际尺度上北太平洋 SST 的空间结构具有类 ENSO 模态，作为年际尺度的背景，可能对 ENSO 事件有重要影响 (Latif, 1998)。

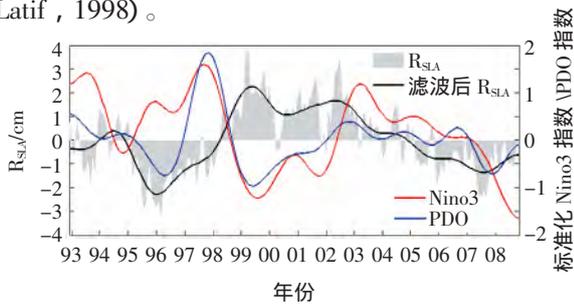


图 3 黑潮延伸体 SLA 残差序列、标准化 Nino3 指数与 PDO 指数

### 3 黑潮延伸体海域海平面与海流的关系

#### 3.1 黑潮延伸体的海流变化

流函数的分布特征反映了环流特征，大洋西边界的黑潮及延伸体急流处流函数等值线密集，梯度大；大洋内区等值线稀疏。黑潮主轴处对应着流函数梯度最大的区域，主轴右侧流函数可达  $40 Sv$  ( $1 Sv = 10^6 m^3/s$ )，左侧仅为  $10 Sv$ 。在经常发生黑

潮大弯曲的日本以南和以东海域是流函数变化剧烈的海域。沿黑潮延伸体向东，在  $155^\circ E$  之后黑潮延伸体下游区海流变化较弱，主要表现为向东的北太平洋流。

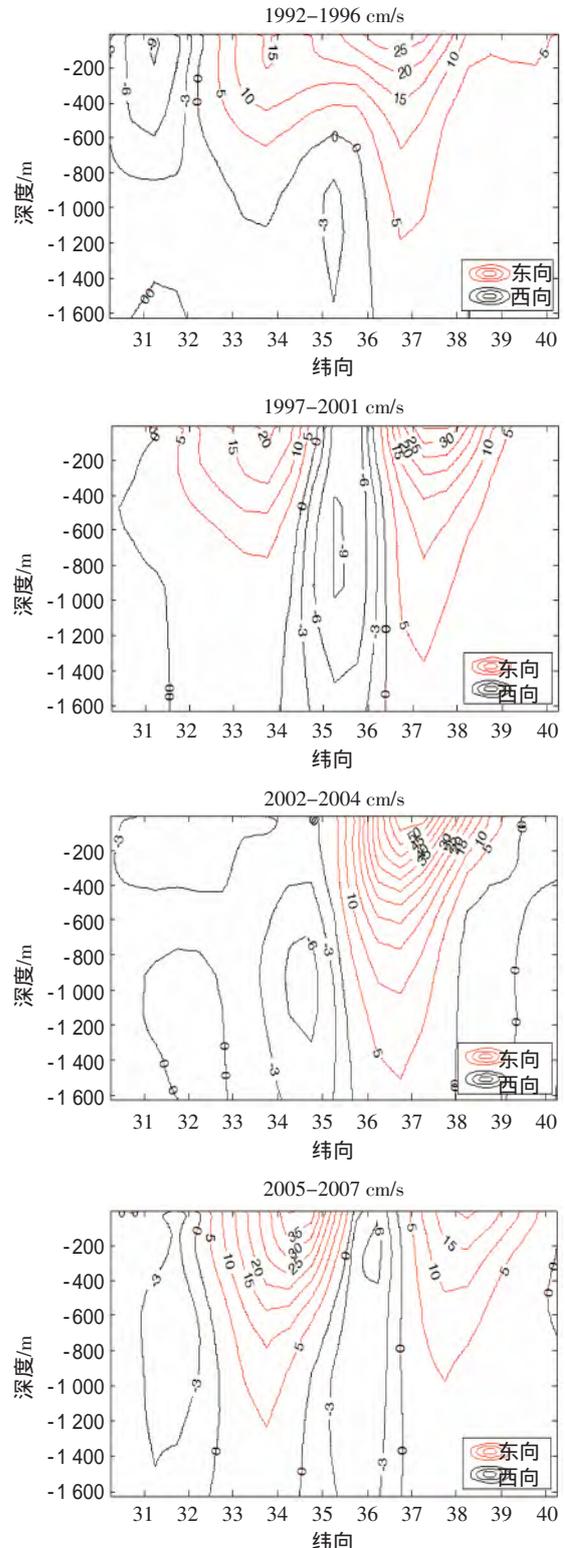


图 4  $143^\circ E$  断面流速年际变化

Qiu 等 (2005) 发现在非弯曲的年份黑潮路径变化复杂,而在黑潮大弯曲年份路径较稳定。研究发现,黑潮路径特征可划分为以下 4 个时段:1992-1996 年弱型大弯曲期,1997-2001 年非弯曲期,2002-2004 年强型大弯曲期,2005-2007 年非弯曲期(图 4)。黑潮在 32°N 沿日本海岸向东流远离海岸,在 141°E 左右转而向北,在日本以东海域形成黑潮延伸体,大弯曲年份黑潮路径弯曲且稳定,而非弯曲年份路线变化复杂,总体呈直线路径,水平流场上可见黑潮主轴北侧会出现明显的涡旋。

黑潮延伸体急流的强度与黑潮大弯曲关系密切,具有显著的年际变化(图 5)。本文用黑潮主轴南北 1.5° 范围作为流幅宽度,15 cm/s 流速界线作为主轴影响深度(陈红霞,2006)。143°E 断面是黑潮路径变化最显著的断面。急流主轴呈蛇形弯

曲,春季偏南,八九月份时流轴开始北抬,在 143°E 断面上,冬季流轴较夏季北移约一个纬度,季节变化的幅度较年际变化小。1992-1993 年弱型大弯曲期间黑潮路径呈弯曲状态,流轴稳定,主轴在 37°N,流速大,流轴影响较深,但流幅较窄。在 1997-2001 年非弯曲期间黑潮延伸体流轴不稳定,流幅变宽流速小,主轴南压,北部有流核脱落,大弯曲消失,在 33°N 和 37°N 分为两支(图 4),北支较强,南支主轴在 34°N 左右徘徊前进。1997 年冬至 1998 年秋急流主轴异常现象可能与 1997/1998 的 El Niño 事件有关。2002-2004 年强弯曲期,急流主轴呈一支强劲的海流,主轴位置向北迁移至 37°N 附近,此时黑潮大弯曲形成,流幅变窄,流速增大,其中 2003-2004 年流速出现极大值,流轴影响最深。在 2006 年以后大弯曲消失,黑潮强

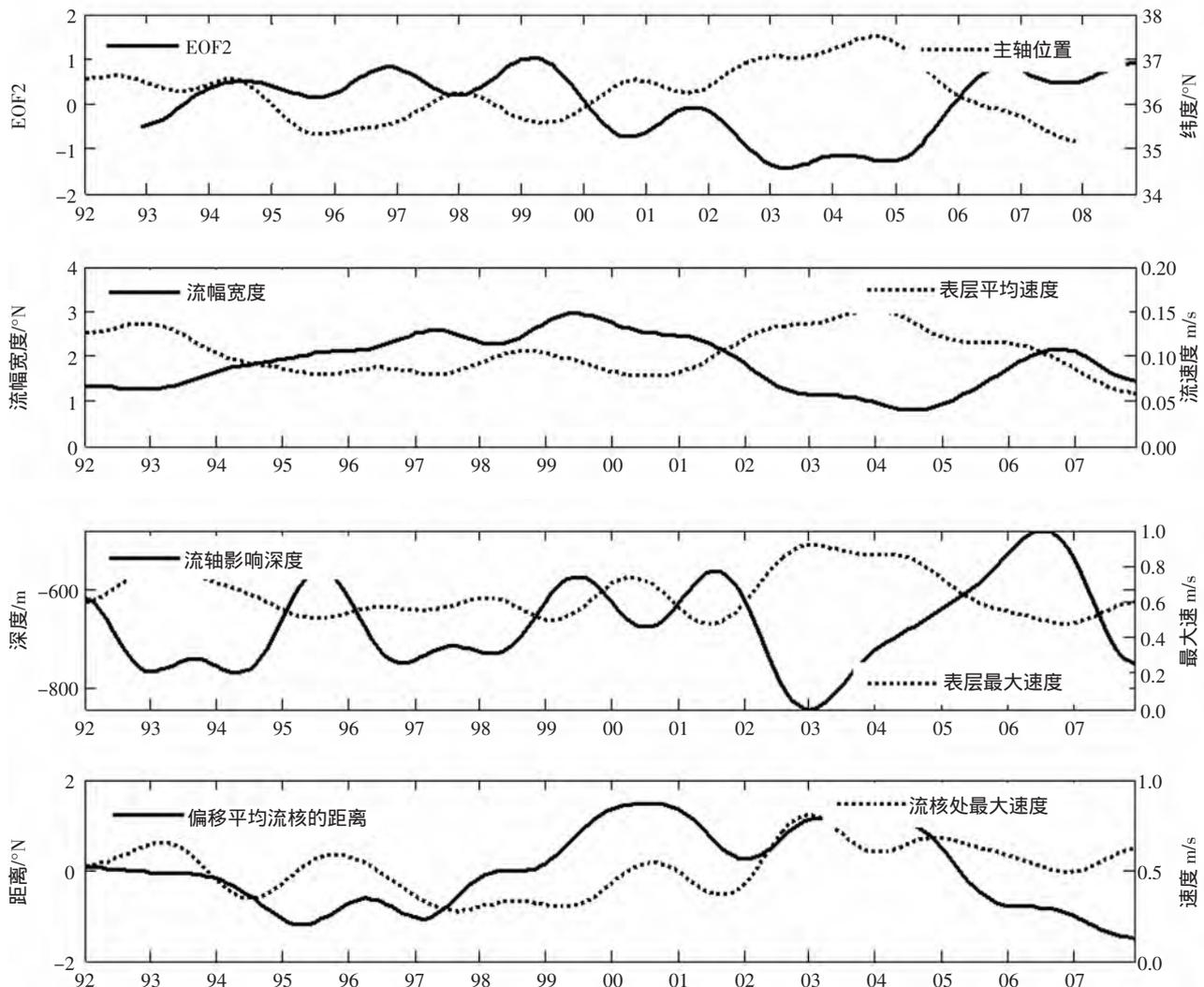


图 5 黑潮延伸体急流主轴位置、流幅、流速的年际变化

度减弱，路径不稳定，再次向南偏移，急流再次分为南北两支，南支较强，此时流幅再次变宽，流轴变浅，流速也随之减小。

### 3.2 海平面变化与海流的关系

黑潮延伸体海域是黑潮路径变化最显著的海区，也是海平面变化显著的海域。日本以南急流离岸弯曲处海平面呈下降趋势，最大可达 15 mm/a；日本以东急流主轴南侧海域海平面上升尤为显著可达 20 mm/a，KE 区是全球海平面上升最显著的海域（杜凌，2005），主轴北侧海平面稍有下降，均与黑潮大弯曲位置对应。本文计算的海面高度（SSH）是 SLA 和平均海面高度之和，用于分析海流与 SSH 变化的关系。考虑到黑潮延伸体海面高度的变化，结合海流再分析资料，本文利用 23 Sv

流函数等值线判定黑潮主轴，分析黑潮与海平面变化的关系。

弱弯曲期间，在日本岛和沙茨基海隆之间，主轴发生两个准静止弯曲（图 6，a、e），主轴南侧 SSH 极大值区可达 200 cm 以上，143 °E 断面东西两侧存在对涡，主轴附近海平面变化平缓。非弯曲期间（1997–2001 年、2005–2007 年），急流主轴南压，急流强度减弱，涡动能增大，主轴北侧涡旋增强甚至与主轴脱离（图 6，f）；此时延伸体海域内 SSH 较低，流轴附近海面高度南北梯度不明显，自南向北缓慢降低；SLA 场中尺度涡异常显著，33 °N–36 °N 自东向西移动的气旋涡与反气旋涡相间排列。

2002–2004 年强型大弯曲期间，急流强度增

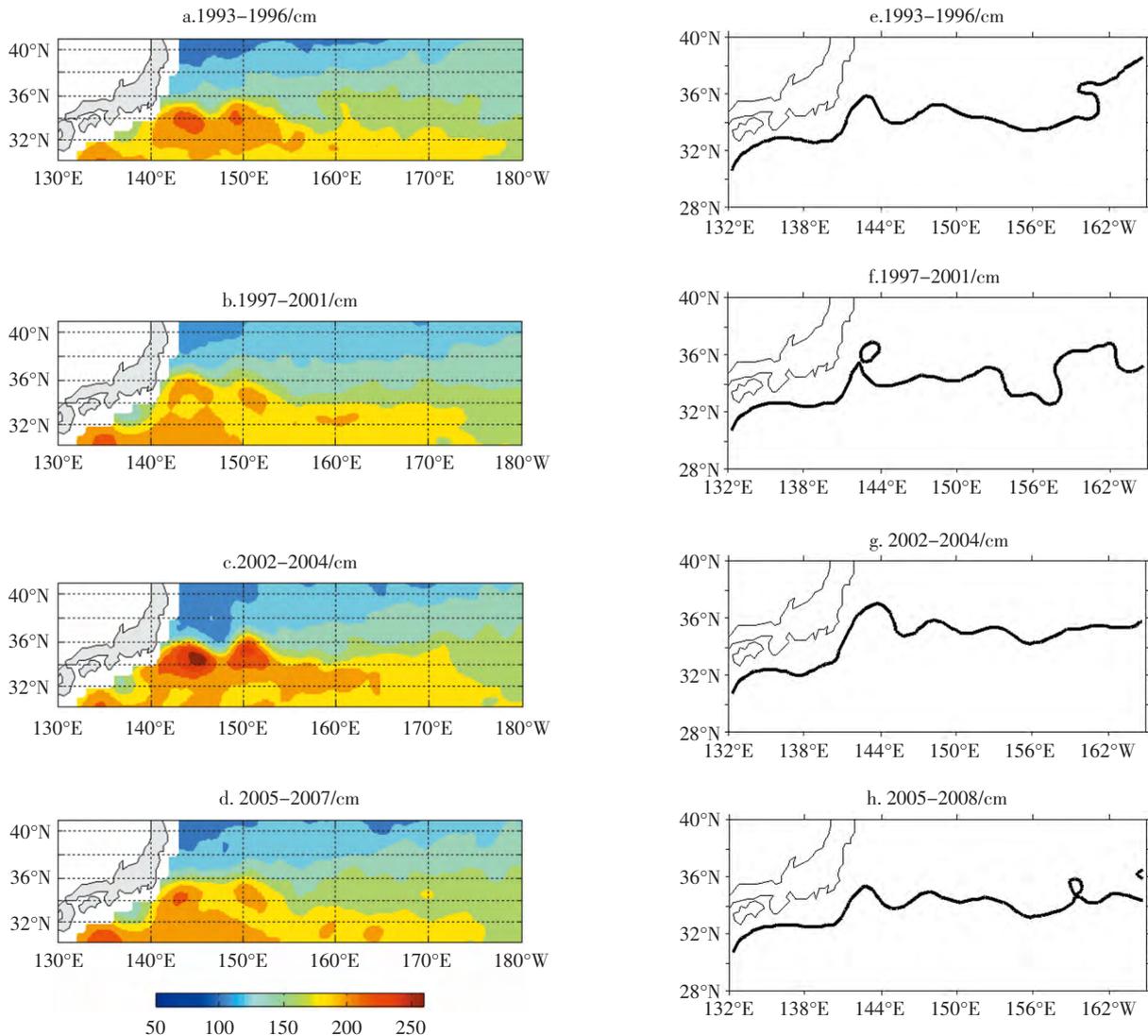


图 6 黑潮延伸体海域海面高度 (a-d，单位 cm) 与主轴位置 (e-h)

大，此时黑潮延伸体海平面达到年际变化的最大值，主轴两侧海面高度梯度较大。尤其在主轴的两个准静止弯曲南侧，海面高度达 250 cm；中尺度涡数量减少，涡动能减小，此期间反气旋涡占主导，气旋涡与反气旋涡的位置与 EOF 第一模态空间分布相似（图 1）。这说明，海洋环流对海平面变化影响显著，黑潮大弯曲路径时，急流增强，涡流相互作用减弱，海面高度高，此外海流将温暖海水带到高纬度海域，次表层增暖，海洋水体受热膨胀也会导致海平面升高；洋盆尺度上的风场年代际调整，也有利于出现高海平面。反之，非弯曲路径时，海平面较低。

### 3.3 海平面影响因素的调整作用

黑潮延伸区海平面的变化与海洋的动力、热力调整密切相关，接下来分别分析其对海平面变化的影响。

考虑到黑潮延伸体流和地形的影响，本文以

155 °E 为界将黑潮延伸体流分为上游和下游两部分 (Teague et al, 1990)，分析 KE 上下游区海平面年际变化与海流的关系。黑潮是一支斜压性很强的海流，处在准地转平衡之中。根据地转关系，本文以 100 m 以下的海流资料以除去上层 Ekman 流的影响，以 1 000 db 为参考面，计算海流作用影响下主轴两侧海面高度差 (dH<sub>Cal</sub>)。同时基于卫星高度计资料计算的海面高度 SSH 数据得到实测主轴两侧海面高度差 (dH<sub>Sat</sub>)，比较两种方法得到的海面高度差。KE 区海平面的经向结构受海流影响显著 (Taguchi et al, 2007)，本文通过主轴两侧海面高度差，探讨黑潮延伸体海域海流的动力作用在海平面变化中的调节作用。

年际尺度上，海面高度变化与海流密切相关，主轴两侧的海面高度差表征着流量的相对变化特征 (潘家伟, 1997)。在黑潮弯曲路径的年份，流幅窄，流速大，急流输运量较大 (图 7)，主轴两侧

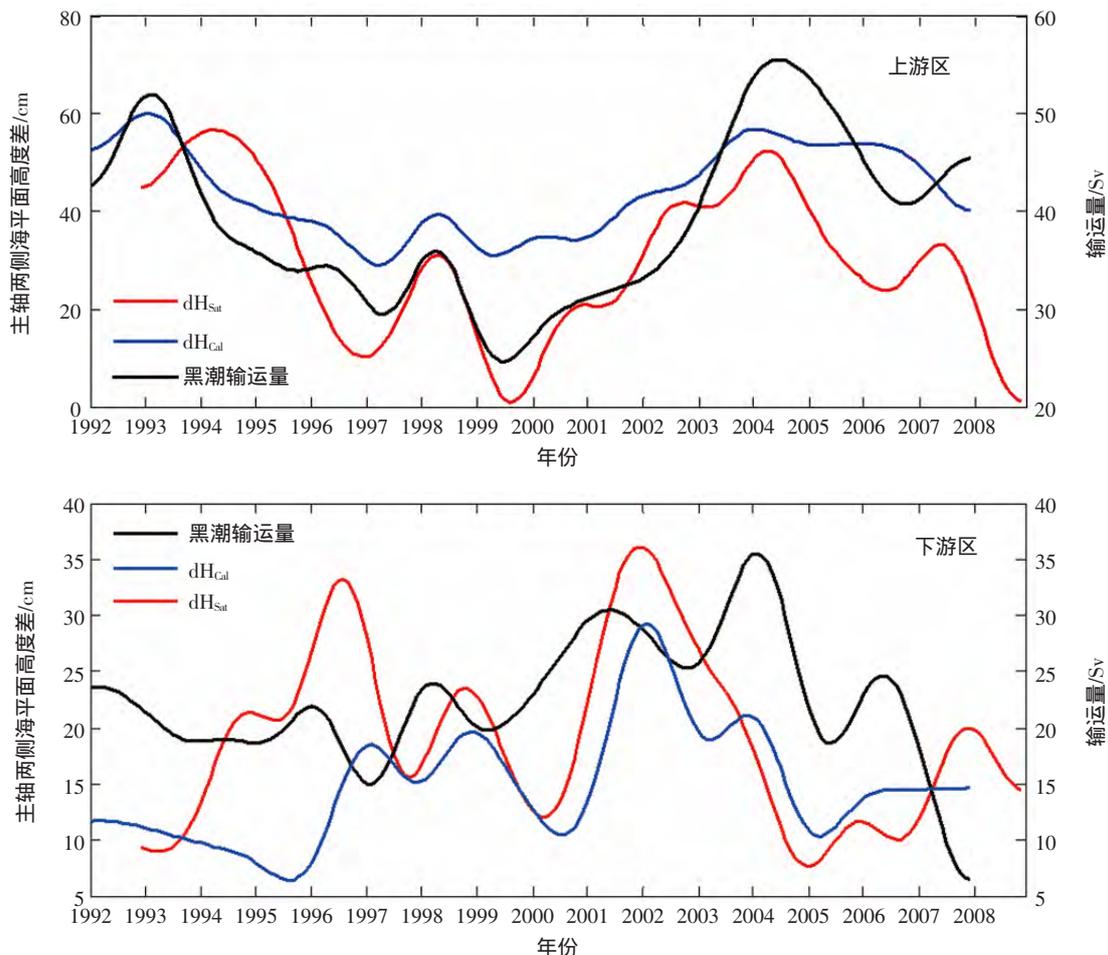


图 7 主轴两侧海平面之差实际值 (红线) 与计算值 (蓝线) 以及黑潮输运量 (黑线)

的 SSH 之差也较大；主轴以南 SSH 较高，局部区域可达 270 cm，存在两个显著的极大值区；如 1992–1993、2002–2004 年。大弯曲发生时黑潮延伸体流向东的净输送比直线路径时多 30%（谷德军，2004）。在黑潮直线路径的年份，流幅宽，流速小，输运量较小；黑潮主轴以南的 SSH 较低且变化小，只有 200 cm 左右；主轴两侧 SSH 之差也随之变小，如 1997–2001 年。

上游区海平面变化受海流体积输运的影响比下游区显著（图 7）。上游区，海流作用下主轴两侧海面高度差（dHcal）约为 50 cm，比卫星资料实测 dHsat 约大 10 cm，两者的变化密切相关，同步相关系数可达 0.71。黑潮大弯曲期间 dHcal 显著增大，海面高度总体升高，在主轴附近尤为显著；非弯曲期间流量小，主轴两侧 dHcal 小，此时海面高度低。下游区主轴两侧实测 dHsat 为 20 cm 左右，海流作用下 dHcal 稍小于 dHsat，滞后 4 个月时相关系数为 0.67。下游区急流主轴变化大，急流流幅

变宽。通过小波分析，黑潮延伸体主轴两侧 dHsat 具有显著的季节和 2–3 年的年际变化。1993、94 年季节变化和年际变化相当，1997–2004 年，年际变化占主导，而到 2005–2006 年则季节变化较强。下游区黑潮海流强度变小，海流动力作用下的海平面变化约占该区域海平面变化的 60%。

此外，KE 区海域是北太平洋海气交换最剧烈的区域之一，海平面受海流影响之外，温盐作用下的比容海平面也是海平面变化的主要因素。通过计算上下游区比容海平面，分析热力部分对海平面变化的影响。1993–2008 年黑潮延伸体海域海平面和比容海平面变化的显著区域趋于一致，其核心区位于（34°N–36°N，143°E–150°E）。1997–2005 年间，上游区比容海平面和 T/P 海平面均呈明显的上升趋势，之后显著下降。比容海平面年际变化稍小于海平面变化，比容海平面的季节变化约占海平面季节变化的 65%。KE 区海平面和比容海平面的年际变化明显，两者变化较为相似，比容海平面是

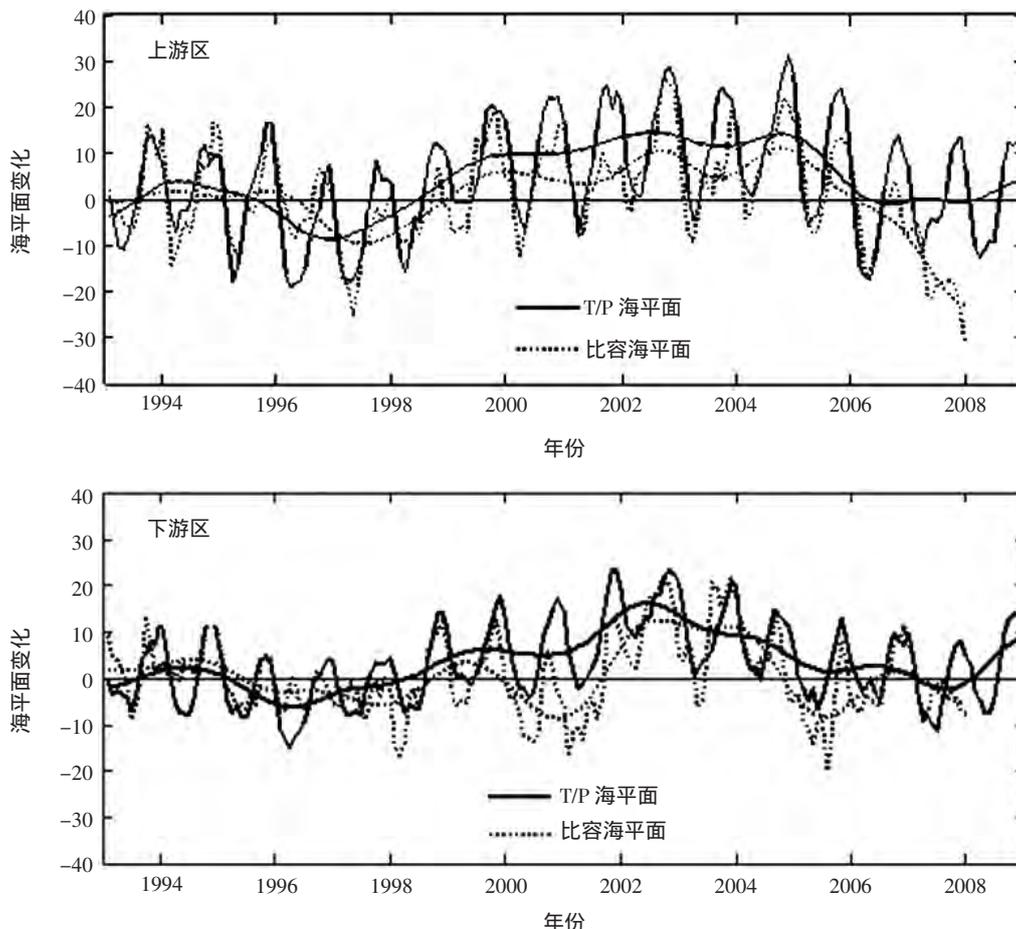


图 8 KE 区海平面、比容海平面及其 2 年低通滤波

KE 上下游区海平面变化主要因素。

黑潮延伸体海区海平面变化受海流和温盐比容效应的共同影响,且相互影响相互制约,比容效应和海流共同调控该区域海平面变化。上游区黑潮海流强度大,海流动力作用显著。大弯曲期间(2000-2004年),海流强度大,海流影响较深,冬季混合层深度较深,同期海洋表层得热明显,次表层海温以正温度异常为主,上层海洋水温相对均匀。非弯曲期间,例如1997年夏季混合层最浅,尽管同期KE上游区海洋表层得热并不显著,但海洋层化加强,抑制了混合层上下水交换,有利于次表层的温度负距平维持,导致比容海平面降低,进而海平面出现显著下降。

## 4 结论

利用卫星观测的海平面异常和海流资料,分析海平面和海流的年际变化特征,运用EOF、带通滤波、随机动态分析等方法,探讨海平面低频变化与海流的关系。主要结论如下:

黑潮延伸体海平面异常EOF第一模态是季节模态,第二模态是黑潮大弯曲模态。海平面的低频变化受海洋大气大尺度相互作用影响显著。黑潮大弯曲的2002-2004年,海平面的低频分量与Nino3指数的相关系数为0.74;1997/1998 El Niño前后低频分量与PDO指数相关系数达-0.73。

海平面年际变化和黑潮延伸体急流密切相关。急流呈弯曲路径时,急流主轴北抬,流轴稳定流速大,输运量较大,准静止弯曲南侧海平面较高,主轴两侧海面高度梯度大。非弯曲期间,急流主轴南压,急流强度减弱,中尺度涡活跃,海平面较低,流轴附近的梯度不明显。主轴两侧海面高度差(dHcal)与卫星资料计算的dHsat变化密切相关,同步相关系数可达0.7。上游区海平面变化受黑潮大弯曲影响更为显著。

黑潮延伸体海区比容效应和海流共同调控该区域海平面变化。黑潮强度越大,更多的低纬度高温高盐水将被输送到中纬地区,使延伸体海域海水获得巨大的能量:一方面从低纬度来的高温高盐水影响该海区的温盐结构,通过比容效应进而影响海平面;另一方面巨大的海水体积输运,直接影响该海域海平面变化及其空间区域特征;此外,黑潮

本身携带巨大的能量,其强度变化在动力学特征上对海平面变化产生巨大影响。可见,年际尺度上,区域海平面变化中的大尺度海洋环流变化的作用不可忽视,海流对海平面变化有重要影响。

致谢:感谢法国国家空间研究中心(CNES)的卫星海洋学存档数据中心(AVISO)为本文提供海平面异常数据;全球简单海洋资料同化分析系统(Simple Ocean Data Assimilation)提供的再分析海流数据;Qiu Bo教授提供的平均海面高度数据。

## 参 考 文 献

- Johns W E, Lee T N, Zhang D, 2001. The Kuroshio east of Tai wan: moored transport observations from the WOCE PCM-1 array. *J Phys oceanography*, 31: 1 031-1 053.
- Latif M, 1998. Dynamics of interdecadal variability in coupled ocean-atmosphere models. *J Climate*, 11: 602-624.
- Naeije M C, Ambrosius B A C, 2000. Seasonal cycle and inter-annual variability of the Kuroshio/Oyashio current system using multi-channel sea surface temperature and altimetry sea level data. *Adv. Space Res*, 25 (5) : 1 103-1 106.
- Qiu B, 1991. Mean flow and variability in the Kuroshio Extension from Geosat altimeter data. *J Geophys Res*, 96 (18) : 491-507.
- Qiu B, Chen S, 2005. Variability of the Kuroshio extension Jet, recirculation gyre and mesoscale eddies on decadal time scale. *Journal of Physical Oceanography*, 35 (11) : 2 090-2 103.
- Taguchi B, Xie S P, Niklas Schneider, et al, 2007. Decadal variability of the Kurshio Extension: observations and an eddy-resolving model hindcast. *Journal of Climate*, 20: 2 357-2 377.
- Teague W J, Carron M J, Hogan P J, 1990. A comparison between the Generalized Digital Environmental Model and Levitus climatologies. *Journal of Geophysical Research*. 95: 7 167-7 183.
- Yan M, Zuo J C, Du L, et al, 2007. Sea level variation/change and steric contributions in the East China Sea. ISOPE-2007 conference.
- 蔡榕硕, 2009. 源地黑潮及其上下游流量的变化特征. 台湾海峡, 28 (3) : 299-307.
- 陈红霞, 袁业立, 华峰, 2006. 东海黑潮主段 G-PN 断面的多核结构. 科学通报, 51 (6) : 730-737.
- 杜凌. 全球海平面变化规律及中国海特定海域潮波研究. 中国海洋大学. 2005 年.
- 高理, 刘玉光, 荣增瑞, 2007. 黑潮延伸区的海平面异常和中尺度涡的统计分析. 海洋湖沼通报, 27 (1) : 14-23.
- 谷德军, 王东晓, 袁金南, 2004. 黑潮输送的异常及其与大尺度海气相互作用的关系. 热带海洋学报, 23 (6) : 30-39.
- 贾英来, 刘秦玉, 刘伟, 等, 2004. 台湾以东黑潮流量的年际变化特征. 海洋与湖沼, 35 (6) : 507-511.
- 李坤平, 房宪英, 刘丽惠, 1993. 海平面变化对黑潮变异的响应. 黄

- 渤海海洋, 11 (4) : 30-37.
- 潘家炜, 袁业立, 郑全安, 1997. 用 Geosat 高度计数据观测黑潮流系的低频变化-季节及年际变化分析. 海洋学报, 19 (4) : 51-62.
- 荣增瑞, 刘玉光, 陈满春, 等, 2008. 全球和南海海平面变化及其与厄尔尼诺的关系. 海洋通报, 27 (1) : 1-8.
- 王元培, 1995. 137°E 断面北赤道流、黑潮变异和黑潮大弯曲的关系. 海洋科学, 1 : 42-47.
- 杨龙奇, 许东峰, 徐鸣泉, 等, 2014. 黑潮入侵南海的强弱与太平洋年代际变化及厄尔尼诺-南方涛动现象的关系. 海洋通报, 36 (7) : 17-26.
- 曾丽丽, 贾英来, 施平, 2006. 黑潮反气旋涡脱落时南海北部的海温分布. 海洋通报, 25 (5) : 77-83.

(本文编辑:袁泽轶)